

**CONCOURS NATIONAL COMMUN  
D'ADMISSION AUX GRANDES ECOLES  
D'INGENIEURS  
MAROCAINES**

Session : 2008  
Filière : TSI

Epreuve de Technologies et de Sciences  
Industrielles  
Durées : 6 heures

**Composition du sujet :**

**Le sujet comporte deux projets indépendants :**

- **PROJET MECANIQUE.**
- **PROJET ELECTRIQUE.**

**IL EST DEMANDER DE TRAITER LES DEUX PROJETS SUR DEUX  
COPIES SEPARÉES**

**Projet Mécanique :**

- Enoncé du sujet : page 1 à 7.
- Dossier technique DT1 à DT5 : page 8 à 11.
- Documents réponse DR1 à DR3. (à joindre à la copie - partie Mécanique-) : page 12 à 14.

**Projet Electrique :**

- Enoncé du sujet : pages de 1 à 9.
- ANNEXE 1 : page 10.
- ANNEXE 2 : page 11.
- Documents réponses: pages de 12 à 16. (à joindre à la copie –partie Electrique-)

Il est conseillé de lire la totalité de l'énoncé avant de commencer l'épreuve. Si au cours de l'épreuve le candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre.

**Aucun document supplémentaire n'est autorisé.  
Calculatrice autorisée.**

## SYSTEME D'INJECTION DIRECTE COMMON RAIL POMPE HDi PEUGEOT 206

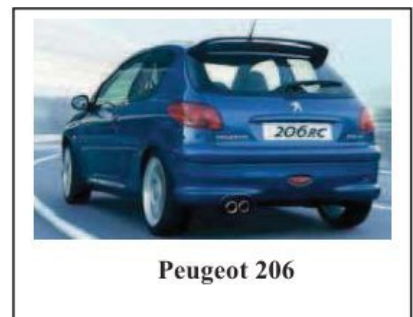
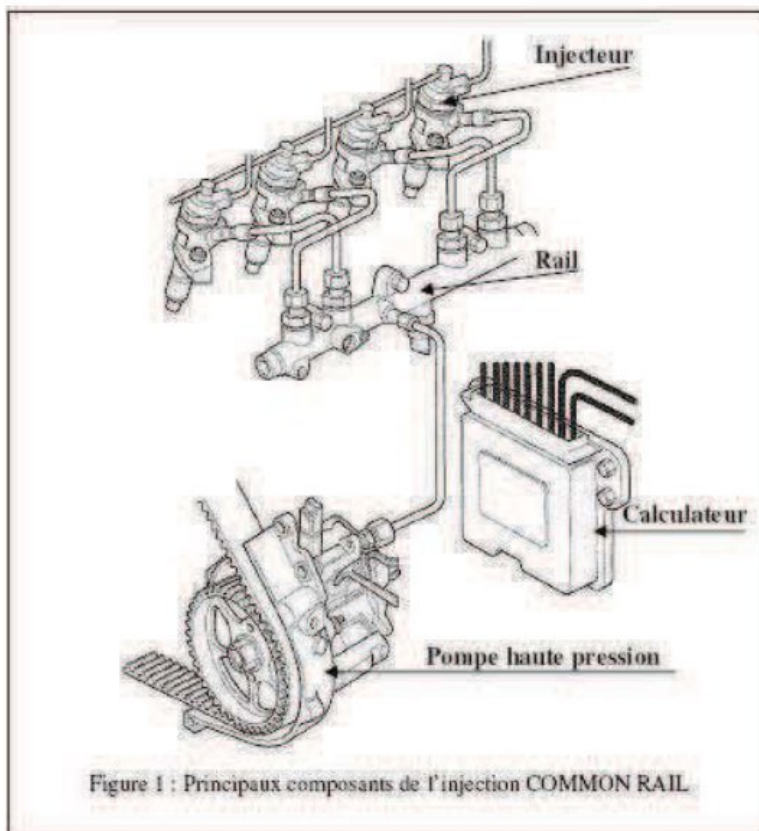
### PRESENTATION DU SYSTEME

À la recherche permanente d'une avancée technologique, Peugeot a conforté son savoir-faire dans ses sites de production, aussi bien au niveau de la robotique qu'au niveau du système HDi.

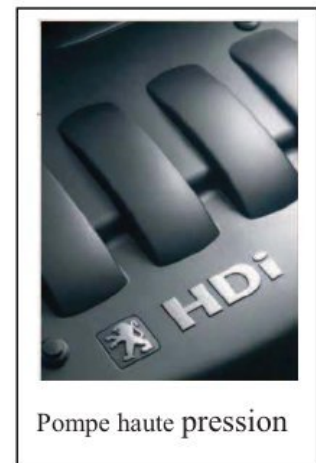
Le système HDi équipe tout naturellement la gamme 206. Le sigle HDi désigne une pompe alimentant en carburant la rampe commune dite "common rail" jusqu'à une pression de 1350 bars sur le moteur 1,4 l et 1500 bars sur le moteur 2,0 l. L'ensemble de ces éléments optimise l'agrément de conduite (couple, souplesse, puissance), réduit la consommation, la pollution, les bruits de combustion et les vibrations.

Le système de gestion de l'injection appelé «**Common Rail**», utilise la très **haute pression commandée électroniquement**.

Sur ce système, une pompe haute pression, entraînée par le moteur, alimente en permanence une réserve de gazole sous haute pression : le "Rail" ou rampe d'alimentation (cf. figure 1).



Peugeot 206



Pompe haute pression

Parmi les circuits de puissance assurant la variation et le contrôle de vitesse dans les sites de production on trouve un convertisseur de fréquence associé à un moteur asynchrone.

## **Projet mécanique (Temps conseillé : 3h)**

**L'épreuve** se compose de cinq parties qui peuvent être traitées de façons indépendantes.

- **PARTIE A :** ANALYSE FONCTIONNELLE
- **PARTIE B :** MODELISATION DE LA POMPE HDi
- **PARTIE C :** ANALYSE MECANIQUE DE LA POMPE HDi
- **PARTIE D :** DEMARCHE DE REALISATION ET DE QUALIFICATION
- **PARTIE E :** ETUDE DE LA RESISTANCE MECANIQUE

### **L'INJECTION DIRECTE COMMON RAIL** (voir DT3 page 9 et DT4 page 10)

#### **1- PRINCIPE**

Sur ce système, la génération de la haute pression et la commande du débit d'injection sont deux fonctions indépendantes l'une de l'autre.

Une pompe haute pression entraînée par le moteur, alimente en permanence une réserve de gazole sous haute pression : le "Rail" ou rampe d'alimentation.

La rampe est reliée par des tubes à tous les injecteurs. L'ouverture de chaque injecteur est commandée par une électrovanne 2/2 intégrée. Un calculateur gère en fonction des paramètres du moteur :

- la pression dans la rampe,
- le débit de la pompe,
- le temps d'ouverture et le phasage (avance injection) de chaque injecteur.
- Le système «Common Rail» permet, pour chaque injecteur, plusieurs injections sur un cycle moteur :
- une injection pilote ou pré-injection,
- une injection principale,
- une post-injection.

#### **2-Fonctionnement de la pompe HDi: (voir DT 1, DT2, DT3 et DT4)**

Le dessin de la pompe haute pression est donné sur le document technique **DT1** ( page 8) .

Le document **DT4** (page10) indique la modélisation retenue.

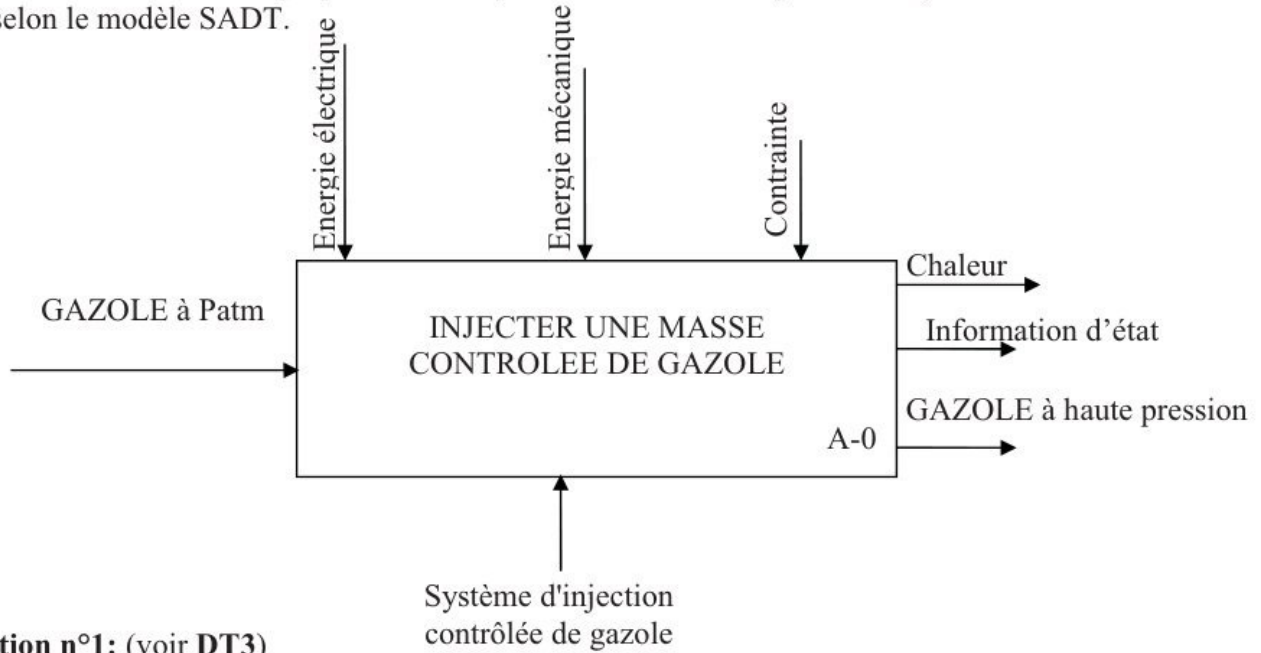
La pompe haute pression possède trois pistons radiaux décalés de 120 degrés. Ils sont commandés par un excentrique (**1**) entraîné par la courroie de distribution avec un rapport de transmission :

$$r_p = \frac{N_{pompe}}{N_{vilebrequin}} = 1.$$

La pompe haute pression alimente la rampe commune, le débit est bien sûr lié à la vitesse du moteur, toute la haute pression sera dirigée vers la rampe commune, elle sera ensuite régulée par un régulateur de pression intégré en bout de rampe.

## Partie A : ANALYSE FONCTIONNELLE

Le niveau A-0 ci-dessous propose une analyse fonctionnelle du système d'injection directe Common Rail selon le modèle SADT.

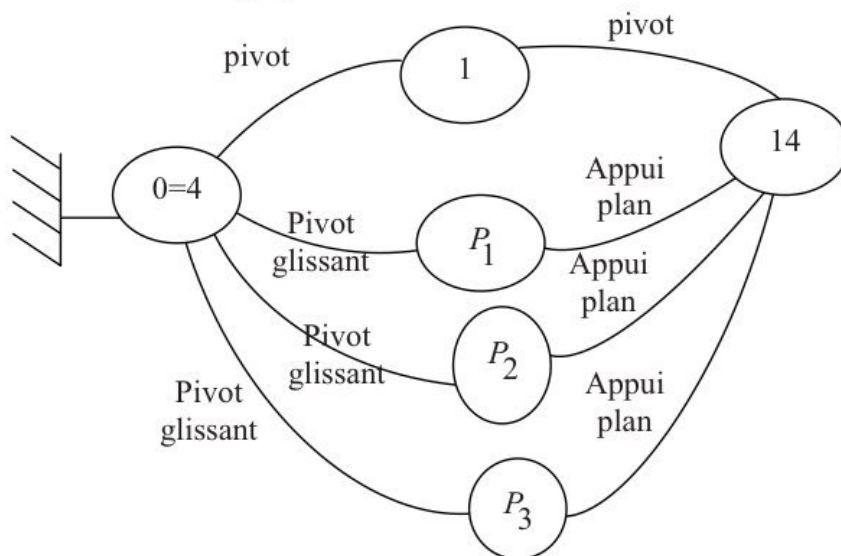


### Question n°1: (voir DT3)

Sur le document réponse N°1 page 12, Compléter le diagramme A0 du système d'injection directe Common Rail en indiquant les flèches manquantes représentant les flux du gazole (haute pression, base pression et Retour ).

## Partie B : MODELISATION DE LA POMPE HAUTE PRESSION HDi (voir DT4 page10)

On travail avec la modélisation de la pompe HDi représentée sur le document DT4 page 10.  
On donne ci-dessous le graphe de structure du modèle :



### Question n°2:

- Donner la(s) mobilité(s) utile(s) et interne(s) du modèle retenu en précisant les mouvements concernés.
- Calculer le degré d'hyperstatisme  $h$  en utilisant une approche globale.
- Donner les avantages et les inconvénients d'un système hyperstatique.

### Partie C : ANALYSE MECANIQUE DE LA POMPE HAUTE PRESSION HDi

L'objectif de cette partie est de valider le comportement de la pompe en terme de puissance absorbée.

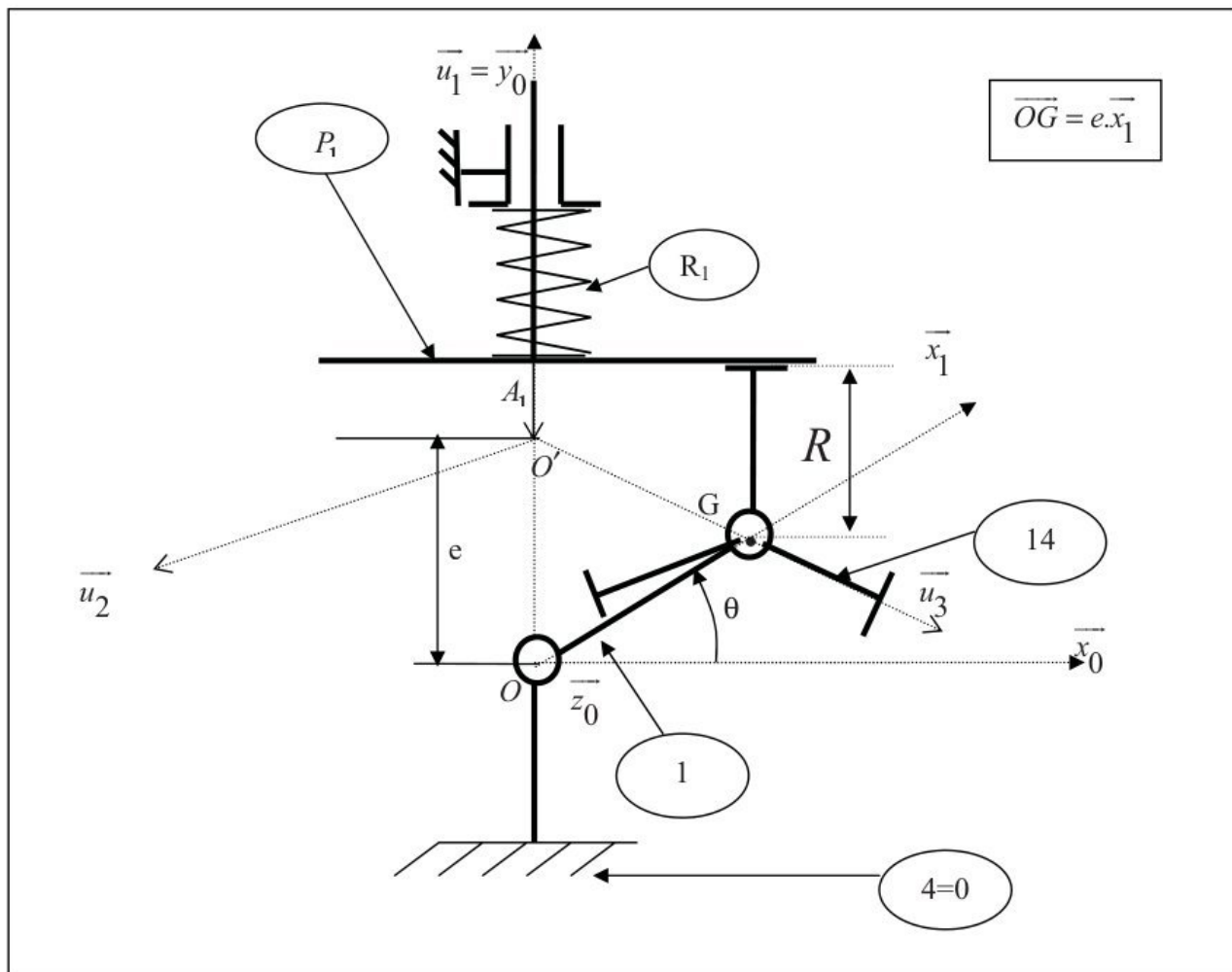
#### C-1 Puissance absorbée par la pompe dans le cas d'un seul piston ( $P_1$ )

Description et modélisation de système (Voir DT4 et figure ci-dessous).

On travail avec la modélisation simplifié représentée sur la figure ci-dessous :

(1) est un arbre excentrique de centre  $O$ , d'excentricité  $e$ , en liaison pivot d'axe  $(O, \vec{z}_0)$  avec le bâti (4).

( $P_1$ ) est en liaison pivot glissant de direction  $\vec{u}_1$  avec le bâti (4) et en contact plan sur plan sans frottement avec la bague à méplats (14).



Notation et paramétrage géométrique :

$R_0(O, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$  est un repère galiléen lié à (0=4) ;  $R_1(O, \vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1)$  est un repère lié à (1). On pose

$$\theta = (\vec{x}, \vec{x}_1) / \dot{\theta} = \omega(t).$$

La position du piston ( $P_1$ ) est repérée par  $r_1(\theta) = r_1 = O'A_1$ .

$$\vec{O'A_1} = r_1 \vec{u}_1 ; \quad \vec{GA_1} \cdot \vec{u}_1 = R ; \quad \vec{OO'} = e \vec{y}_0 \quad (e \text{ positif et constant}) ; \quad \vec{OG} = e \vec{x}_1 ;$$

La section droite d'un piston en contact avec le Gazole est notée ( $S$ ).

### C.1.1 Etude cinématique

**Question n°3:** Par la fermeture géométrique, déterminer la position  $r_1$  du piston ( $P_1$ ) en fonction de  $R, e$  et  $\theta$ .

**Question n°4:** Exprimer littéralement la vitesse  $\vec{V}(A_1 \in P_1 / R_0)$  en fonction de  $e, \theta$  et  $\omega(t)$ .  
En déduire le débit volumique instantané  $q_1$  du piston ( $P_1$ ) en fonction de  $e, \theta, \omega(t)$  et  $S$ .

**Question n°5:** Exprimer littéralement l'accélération  $\vec{\Gamma}(A_1 \in P_1 / R_0)$  en fonction de  $e, \theta, \omega(t), \dot{\omega}(t)$  et  $S$ .

### C.1.2 Etude dynamique

Données et hypothèses d'étude :

-La pression s'exerçant sur la surface d'un piston sera notée ( $p$ ) supposée constante.

-Les chargements et la symétrie géométrique du mécanisme permettent de se ramener à une étude plane.

-La force de pression due au gazole sur le piston ( $P_1$ ) est soit faible (considérée comme nulle en phase d'admission), soit constante de niveau  $p.S$  (en phase de refoulement). Afin d'établir une relation générale, on considère que le gazole exerce toujours sur le piston ( $P_1$ ) une action mécanique notée  $F_{\text{gazole}} \rightarrow P_1 = \alpha_1 \cdot p \cdot S$  avec :

$\alpha_1$  : Coefficient relatif au piston  $P_1$ , ne pouvant prendre que deux valeurs : 0 ou 1.

$\alpha_1 = 0$   $F_{\text{gazole}} \rightarrow P_1 = 0$  : le piston est en phase d'admission.

$\alpha_1 = 1$   $F_{\text{gazole}} \rightarrow P_1 = p.S$  : le piston refoule le gazole à la pression  $p$ .

- L'action, alors du gazole sur le piston  $P_1$  est :  $\left\{ \tau_{\text{gazole} \rightarrow P_1} \right\} = \left\{ \begin{matrix} -\alpha_1 \cdot p \cdot S \cdot \vec{y}_0 \\ \vec{0} \end{matrix} \right\}_{A_1}$
- L'action du moteur sur l'excentrique (1) (cas d'un seul piston ( $P_1$ )) :  $\left\{ \tau_{\text{moteur} \rightarrow 1} \right\} = \left\{ \begin{matrix} \vec{0} \\ C m_1(t) \vec{z}_0 \end{matrix} \right\}$ .
- On donne l'opérateur d'inertie au point  $O$  de l'arbre (1), exprimé dans  $R_1(O, \vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_0)$  :

$$I(O, \vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_0) = \begin{pmatrix} A & 0 & -E \\ 0 & B & 0 \\ -E & 0 & C \end{pmatrix}$$

Avec  $A = 237,4 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$ ,  $B = 236,5 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$ ,  $C = 17,6 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$ , et  $E = 5,6 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$

- La masse de la bague 14 est  $m_{14}$ , et celle du piston  $P_1$  est  $m_p$ .

-Toutes les liaisons mécaniques sont parfaites.

-Le poids de toutes les pièces est négligé devant les efforts mis en jeu.

-L'action du ressort ( $R_1$ ) sur ( $P_1$ ) est négligée devant les actions mécaniques dues à la pression du gazole ( $p = 135 \text{ N} / \text{mm}^2$ ).

**Question n°6:** Exprimer le moment cinétique de l'arbre excentrique (1) dans le mouvement par rapport au Repère galiléen  $R_0 : \vec{\sigma}(o,1/R_0)$ .

**Question n°7:** En appliquant le théorème de l'énergie cinétique à l'ensemble  $E = \{1;14;P_1\}$  dans son mouvement par rapport au repère galiléen  $R_0$ , Exprimer littéralement  $Cm_1(t)$  le couple moteur nécessaire au fonctionnement (cas d'un seul piston ( $P_1$ )).

**Dans toute la suite, on considère que  $m_p$  est négligeable et  $\omega(t) = \omega = \text{constante}$ .**

**Question n°8:** En déduire l'expression du couple  $Cm_1$ , ainsi que la puissance motrice correspondante  $Pm_1$  en fonction de  $K'$  et  $\theta$ . (On donne :  $K' = p.S.e.\omega = \text{constante}$ ).  
Représenter en vert ou (.....) l'allure de  $Pm_1$  sur le document réponse N°2 (page 13).

**C-2 Puissance absorbée par la pompe dans le cas des 3 pistons : ( $P_1$ ), ( $P_2$ ) et ( $P_3$ )**

**Question n°9:** Exprimer littéralement  $Cm_2$  et  $Cm_3$  couples moteurs nécessaires au fonctionnement de piston ( $P_2$ ) et ( $P_3$ ). En déduire l'expression des puissances motrices correspondantes  $Pm_2$  et  $Pm_3$  en fonction de  $K'$  et  $\theta$ .

Représenter respectivement en bleu ou (— · — · —) et en noir ou (————) l'allure de  $Pm_2$  et de  $Pm_3$  sur le document réponse N°2 (page 13).

Remarque :

$Cm_2$  et  $Cm_3$  sont déduites de l'expression de  $Cm_1$  par rotations respectives de  $-2\pi/3$  et  $2\pi/3$ .

**Question n°10:** Représenter en rouge ou (— · · — · · —) sur le document réponse N°2, l'allure de la courbe représentant la Puissance motrice  $Pm$  nécessaire au fonctionnement des trois pistons.

**Question n°11:** Exprimer la puissance motrice  $Pm$  en fonction de la cylindrée ( $Q$ ).

**Question n°12:** Calculer les valeurs mini et maxi de la puissance motrice  $Pm$  :  $Pm_{\text{mini}}$  et  $Pm_{\text{max}}$ , Conclure.

Application numérique :

$p = 13500 \text{ N/mm}^2$ ;  $\omega = 2000 \text{ tr/min}$ ; Cylindrée :  $Q = 0.65 \text{ cm}^3/\text{tr}$ ; nombre de piston :  $n = 3$ .

#### Partie D

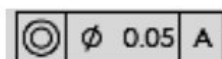
#### DEMARCHE DE REALISATION ET DE QUALIFICATION

Dans cette partie on s'intéresse à l'analyse de quelques opérations d'usinage et de contrôle de l'arbre excentrique (1). (Voir DT 5, page 11)

Pour la réalisation de l'arbre excentrique (1), on a choisi d'utiliser un centre d'usinage 4 axes horizontal.

**Question n°13:** Modéliser par un croquis en perspective, une machine de type centre d'usinage horizontal 4 axes, indiquer ses axes normalisés.

**Question n°14:** Sur le document réponse N°3 (page 14), donnez l'interprétation au sens rigoureux de la norme de la spécification géométrique suivante indiquée sur l'arbre excentrique.



**Question n°15:** Définir le mode opératoire pour la vérification de cette spécification géométrique.

**Moulage :**

La quantité de pièces à produire ainsi que la répétitivité de la série ont conduit au choix d'un procédé de moulage en moule permanent.

**Question n°16:** Citer et définir brièvement les différentes techniques utilisées pour le moulage en moule permanent.

**Question n°17:** Quels sont les avantages du moulage en coquille par gravité par rapport au moulage en moule non permanent à modèle permanent.

**Question n°18:** Quels sont les principaux défauts qui peuvent survenir lors du moulage en moule permanent.

**Partie E**

**ETUDE DE LA RESISTANCE MECANIQUE**

L'objectif de cette partie est de vérifier la résistance à la flexion seulement de l'arbre excentrique. L'étude de la déformée de l'arbre excentrique (1), en résistance des matériaux, peut être menée avec le modèle suivant :

- Arbre : poutre de section droite circulaire de diamètre  $\varnothing 21$  mm supposé constant.
- Actions mécaniques : glisseurs dont la résultante est supposée constante.

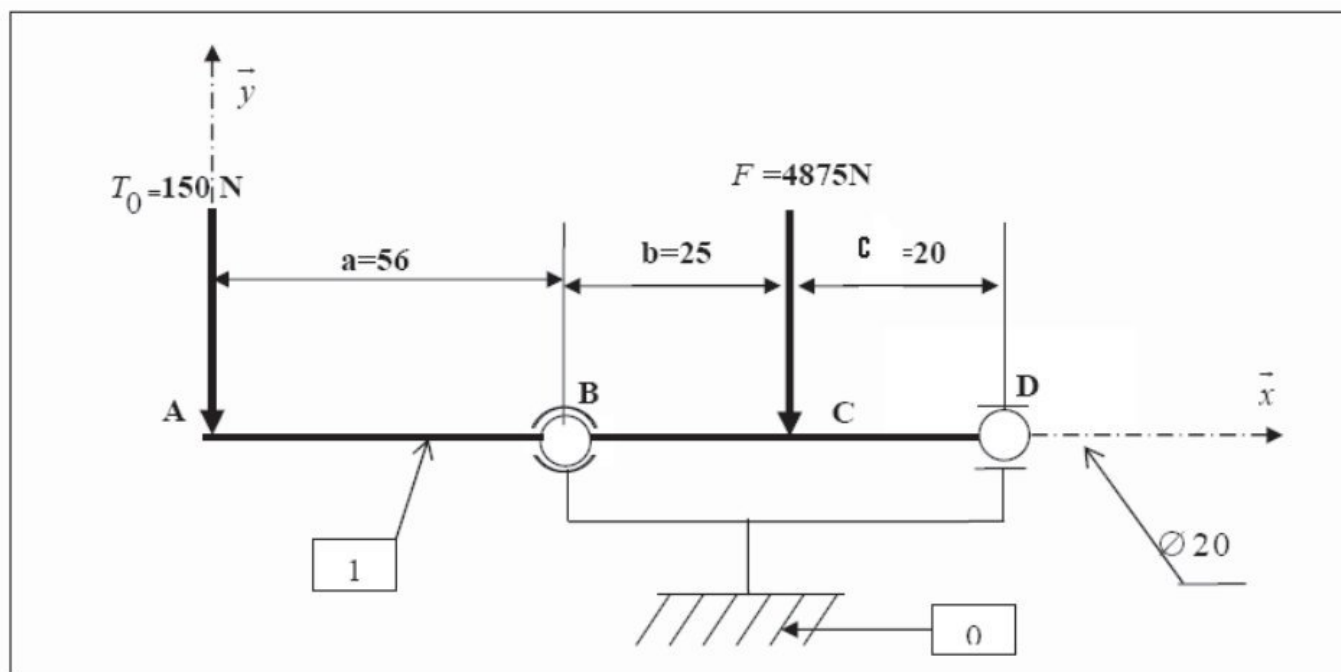
L'arbre excentrique est entraîné par la courroie de distribution (non représenté).

**Donnée et hypothèses :**

- la tension cumulée des courroies est un glisseur dont la résultante  $T_0 = 150$  N .

- l'effort dû à la pression du gazole en phase de refoulement donne une action supposée un glisseur dont la résultante  $F = 4875$  N .

On adoptera le schéma d'étude définie ci-dessous .



Le solide 1 est en acier 35 CrMo 4, le module de Young  $E = 210000 \text{ N/mm}^2$  ; la limite d'élasticité  $Re = 560 \text{ MPa}$ .

Le coefficient de sécurité retenu pour ce type de construction est  $s = 4$ .

On néglige le poids de la poutre.

**Question n°19:** Déterminer les actions mécaniques de contact aux appuis B et D.

**Question n°20:** Exprimer le moment fléchissant  $M_f(z)$  dans les zones AB, BC et CD en fonction de  $T_0$  et  $F$ . Tracer le diagramme correspondant.

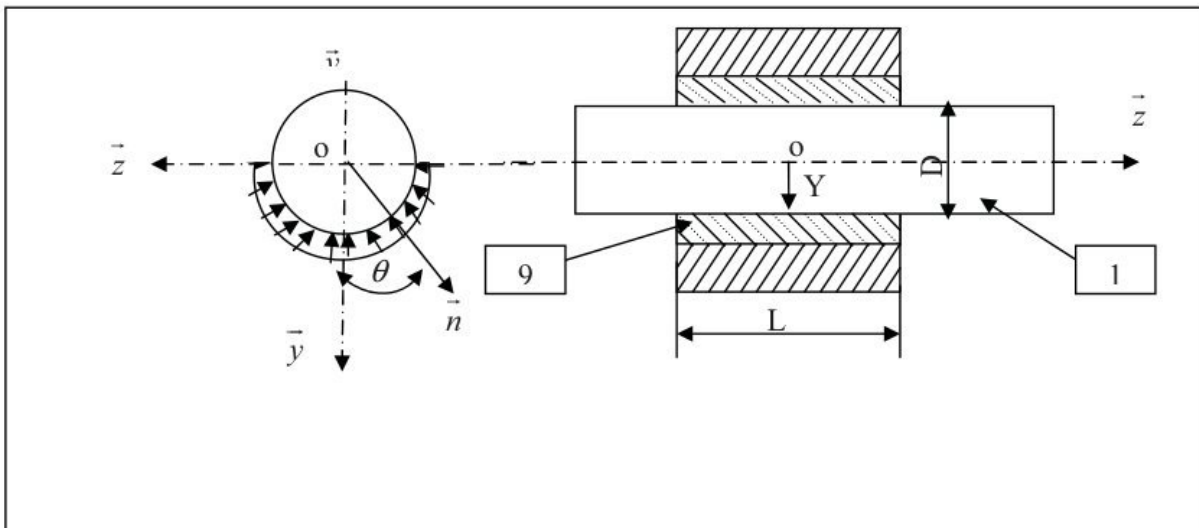
**Question n°21:** Calculer la contrainte maximale de flexion dans l'arbre. Conclure

### Palier lisse ( Etude statique ):

L'objectif de cette partie est de vérifier la pression de contact de l'arbre excentrique (1) sur

Le coussinet (9). La pression admissible  $p_a = 8 \text{ daN/cm}^2$ .

On considère l'arbre excentrique (1), de rayon  $R$ , monté dans une bague en bronze (9) de longueur  $L$  (figure ci-dessous).



Soit  $R(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$  est un repère lié au coussinet (9). l'origine O est au milieu du coussinet 9. On suppose que le contact entre (1) et (9) est parfait (sans frottement), et se fait sur le 1/2 cylindre inférieur de diamètre D. La pression de contact est supposée uniforme exercée par (9) sur (1) en un point M courant de la surface de contact, on pose  $p(M) = -p\vec{n}$

En un point M de la surface de contact on définit  $\vec{OM} = R\vec{n} + z\vec{z}$  et  $\theta = (\vec{y}, \vec{n})$

L'action mécanique de (1) sur (9), est représentée globalement au point O, par le torseur :

$$\{\tau_{1 \rightarrow 9}\} = \left\{ \begin{array}{c} \vec{R} = Y\vec{x} \\ \vec{0} \end{array} \right\}_O$$

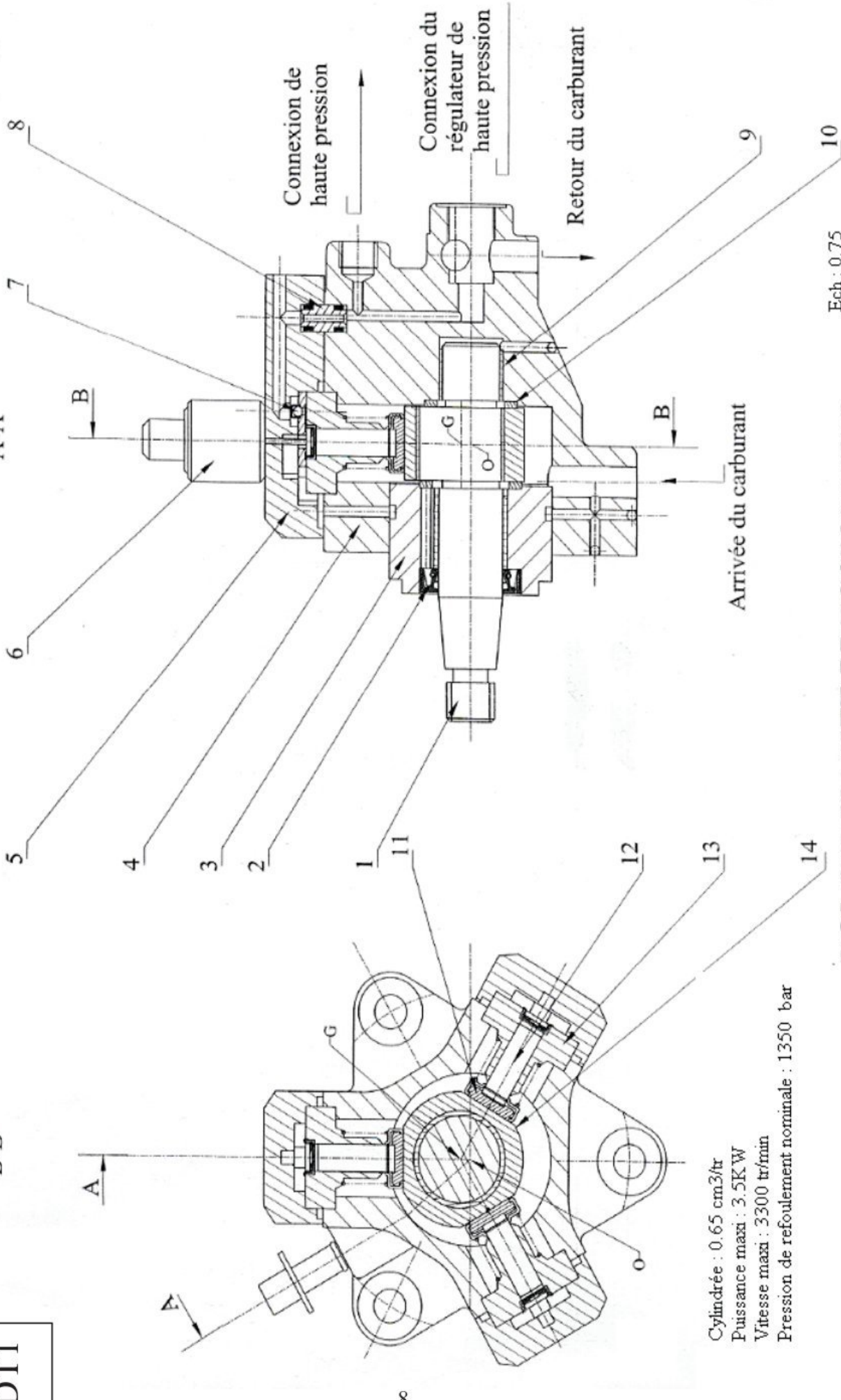
Application numérique :  $Y = 2503 \text{ N}$  ;  $D = 21 \text{ mm}$  ;  $L = 32 \text{ mm}$

**Question n°22:** Déterminer la pression au niveau de contact ( $p$ ) en fonction D, L et Y. Conclure.

DT1

B-B

A-A



POMPE HAUTE PRESSION HDI

DT2

POMPE HAUTE PRESSION -NOMENCLATURE

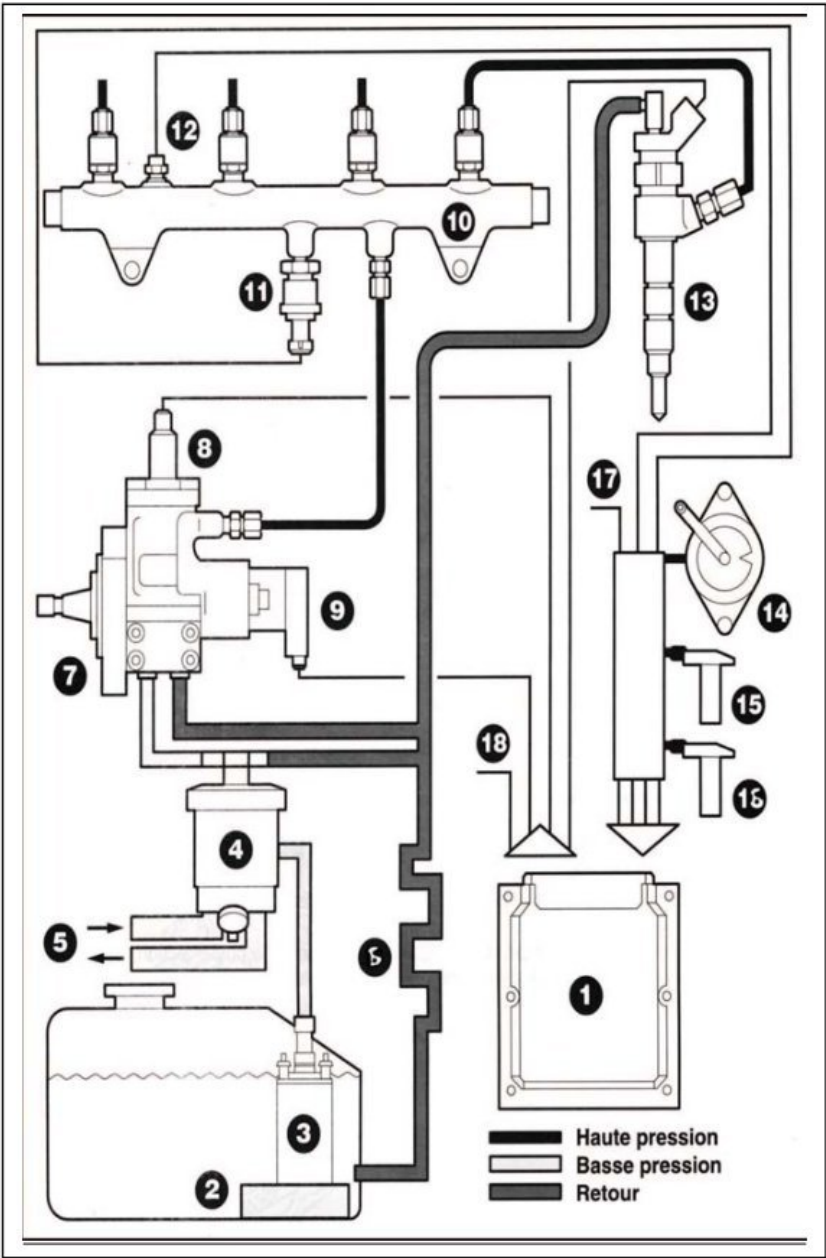
| Repère | Désignation                              | observations |
|--------|------------------------------------------|--------------|
| 1      | Arbre excentrique                        |              |
| 2      | Joint à lèvres                           |              |
| 3      | Flasque                                  |              |
| 4      | Corps de pompe                           |              |
| 5      | Gluasse                                  |              |
| 6      | Désactivateur du 3 <sup>ème</sup> piston |              |
| 7      | Clapet anti-retour                       |              |
| 8      | Pièces de liaison                        |              |
| 9      | Coussinet                                |              |
| 10     | Cales                                    |              |
| 11     | Patin                                    |              |
| 12     | Piston                                   |              |
| 13     | Cylindre                                 |              |
| 14     | Bague à méplat                           |              |

DT 3

VUE D'ENSEMBLE DU SYSTEME D'ALIMENTATION

Nomenclature

- 1 - Calculateur de Contrôle moteur.
- 2 – Préfiltre.
- 3 - Pompe de gavage Basse pression.
- 4 - Filtre principal avec décanteur d'eau.
- 5 - Réchauffeur.
- 6 - Refroidisseur.
- 7 - **Pompe haute pression À trois Pistons radiaux.**
- 8 - Commande de désactivation du Troisième piston.
- 9 - Régulateur de pression
- 10 - Rampe d'alimentation (Ou Rail)
- 11 - Capteur de pression.
- 12 - Capteur de température Gazole.
- 13 - Injecteurs à commande Électrique.
- 14 - Capteur de position de Pédale D'accélérateur.
- 15 - Capteur de régime.
- 16 - Capteur de référence Cylindre.
- 17 - Informations provenant de Différents capteurs.
- 18 - Commande des Actionneurs, Systèmes Annexes et interfaces Avec d'autres systèmes.



# DT 4

## PARAMETRAGE ET MODELISATION DE LA POMPE HAUTE PRESSION HDI

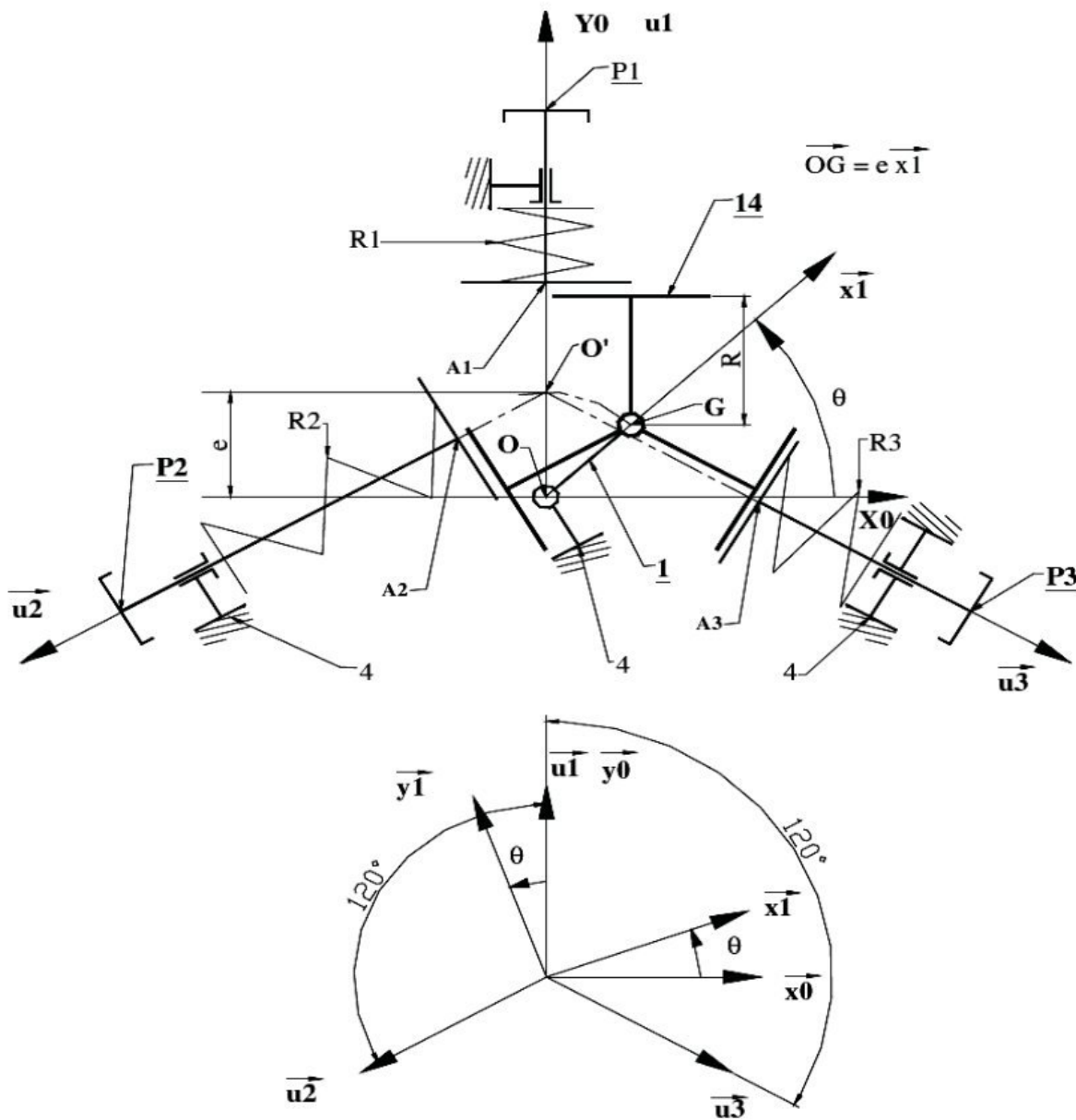
**Le corps de pompe 4 :** Il est considéré comme fixe et le repère  $R_0(o, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$  qui lui est associé est galiléen.

- **L'arbre excentrique 1 :** Il est en liaison pivot d'axe  $(o, \vec{z}_0)$  avec le corps 4.

**La bague à méplats 14 :** Son centre d'inertie est G. G est aussi le centre de la liaison pivot de 14 avec 1. Sa masse est notée  $m_{14}$ . Elle possède trois méplats où les pistons P1, P2 et P3 sont en contact plan sur plan.

Une étude cinématique préalable a permis de montrer que la bague 14 est animée d'un mouvement de translation circulaire par rapport au corps 4, donc  $\overline{\Omega}_{14/4} = \overline{\Omega}_{14/R_0} = \vec{0}$ .

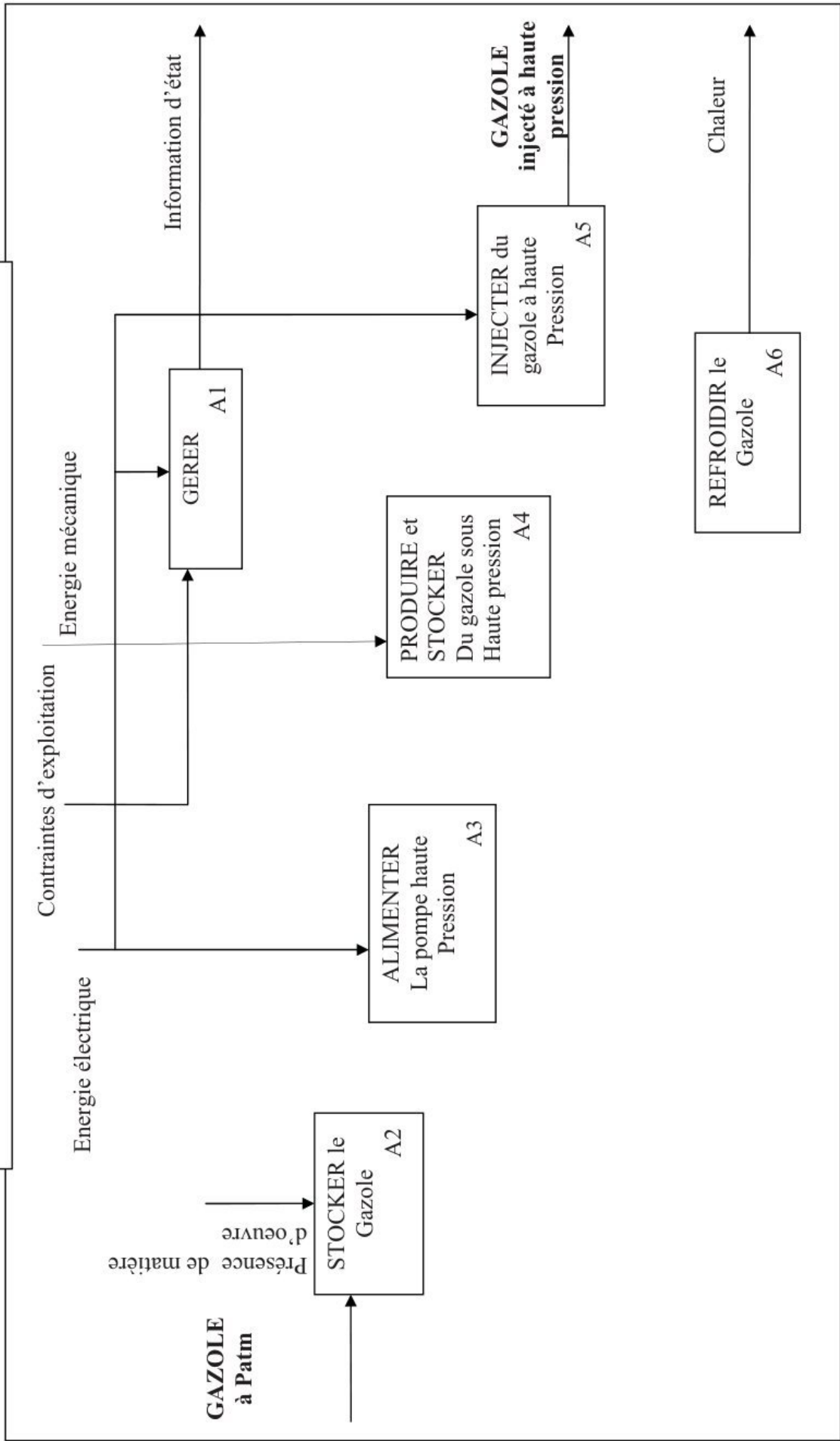
- **Les pistons Pi (P1, P2, P3) :** La position d'un piston Pi est repérée par  $r_i(\theta) = r_i = O'A_i$ . La section droite d'un piston en contact avec le Gazole est notée S, sa masse  $m_p$ . Un piston Pi est en contact plan sur plan sans frottement avec la bague à méplats 14.
- **Les trois ressorts Ri :** Les trois ressorts Ri sont identiques





Document réponse N° 1

Àagrafer sur la copie de composition de l'épreuve du génie mécanique

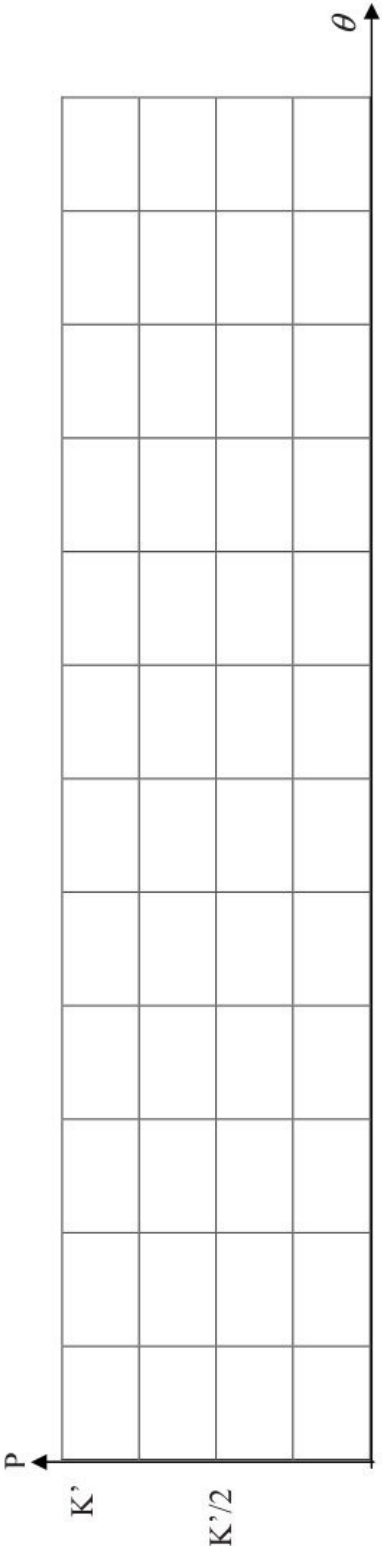


|                                                         |    |
|---------------------------------------------------------|----|
| INJECTER UNE MASSE CONTRÔLÉE DE GAZOLE DANS LE CYLINDRE | A0 |
|---------------------------------------------------------|----|

Document réponse N° 2

Àagrafer sur la copie de composition de l'épreuve du génie mécanique

|            | 0 | $\frac{\pi}{2}$ |   |   |   | $\pi$ |   |   |   | $\frac{3\pi}{2}$ |   |   |   | $2\pi$ |
|------------|---|-----------------|---|---|---|-------|---|---|---|------------------|---|---|---|--------|
| $\alpha_1$ | 1 | 1               | 1 | 1 | 1 |       |   |   |   |                  | 1 | 1 | 1 | 1      |
| $\alpha_2$ |   | 1               | 1 | 1 | 1 | 1     | 1 | 1 |   |                  |   |   |   |        |
| $\alpha_3$ |   |                 |   |   |   | 1     | 1 | 1 | 1 | 1                | 1 | 1 | 1 |        |



0

$\frac{\pi}{2}$ 
 $\pi$ 
 $\frac{3\pi}{2}$ 
 $2\pi$

| TOLERANCEMENT<br>NORMAISE                | Analyse d'une spécification par zone de tolérance  |                            |                     |                   |
|------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------|---------------------|-------------------|
| Symbole de la spécification<br>.....     | Eléments non idéaux<br>Extraits du « skin modèle » |                            | Eléments idéaux     |                   |
| Type de spécification:<br>.....<br>..... | Elément (s)<br>tolérancé(s)                        | Elément(s)<br>de référence | Référence spécifiée | Zone de tolérance |

Document réponse N° 3

Àagrafer sur la copie de composition de l'épreuve du génie mécanique

| Condition de conformité:<br>L'élément tolérance doit se situer tout entier dans la zone de tolérance | Unique groupe | Unique groupe | Simple système commune | Simple composée | Contraintes<br>Orientation position<br>Par rapport à<br>La référence spécifiée |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------|------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Schéma<br>Extrait du dessin de définition                                                            |               |               |                        |                 |                                                                                |

## **PROJET D'ÉLECTRICITE (Temps conseillé : 3h)**

### **Association machine asynchrone / convertisseur de fréquence**

Afin de pouvoir modifier la cadence de production, Peugeot a choisi d'entraîner l'un de ses convoyeurs grâce à une machine asynchrone alimentée par convertisseur de fréquence.

**L'objectif** de l'épreuve est d'étudier des parties de l'ensemble comportant le moteur asynchrone alimenté par l'onduleur. La vitesse est régulée selon la figure 1 de l'annexe 1 page 10.

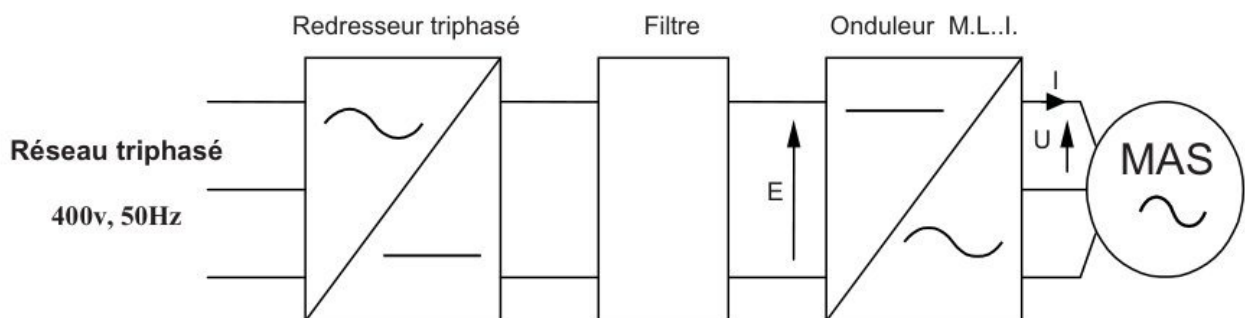
La commande du MLI (modulation de largeur d'impulsion) doit permettre de varier à la fois les tensions statoriques alimentant l'onduleur, et la fréquence statorique tout en gardant le rapport  $\frac{V}{f}$  constant.

Après filtrage et conversion numérique analogique, la vitesse angulaire de la machine est comparée à une vitesse de référence. Le résultat est corrigé, pour donner ensuite la valeur adéquate de la pulsation statorique moyennant la loi de commande.

**L'épreuve** se compose de quatre parties qui peuvent être traitées de façon indépendante.

- **PARTIE 1** Étude de la source de tension continue.
- **PARTIE 2** Étude de l'onduleur de tension en commande "pleine onde".
- **PARTIE 3** Réalisation de la commande "pleine onde" de l'onduleur.
- **PARTIE 4** Étude du moteur asynchrone en régime permanent.

L'ensemble décrit par le schéma de la figure 2, comporte un pont redresseur suivi d'une cellule de filtrage qui alimente l'onduleur de tension associé au moteur.



**Figure 2**

### **PARTIE 1 : Étude de la source de tension continue.**

Cette source est constituée d'un pont redresseur PD3 à diodes supposées parfaites avec sa cellule de filtrage. On suppose que la conduction du pont est **ininterrompue**.

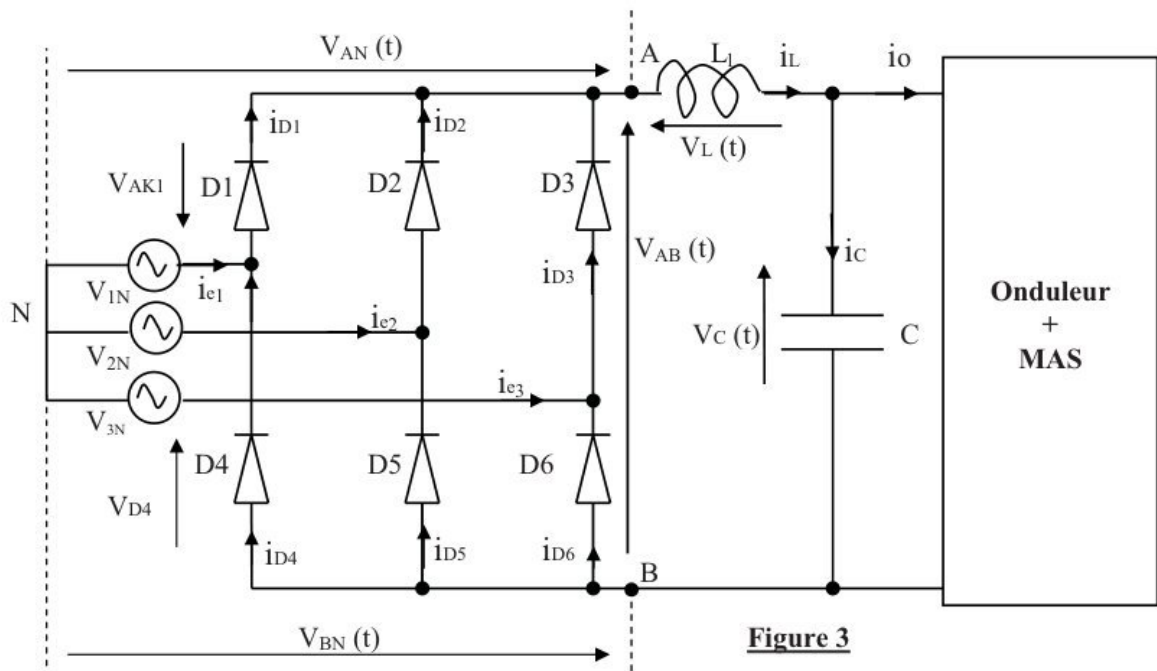


Figure 3

1. Citer deux intérêts de la distribution en triphasé équilibré par rapport à celle en monophasé.

Le redresseur PD3 est connecté en A et B au récepteur formé par la cellule de filtrage, l'onduleur et la machine asynchrone. La bobine  $L_1$  est supposée suffisamment élevée pour que le courant  $i_L$  dans le récepteur puisse être considéré comme parfaitement lissé et égal à  $I$ .

2. Pour les intervalles  $\left[0; \frac{T}{12}\right]$ ,  $\left[\frac{T}{12}; \frac{T}{4}\right]$ ,  $\left[\frac{T}{4}; \frac{5T}{12}\right]$ ,  $\left[\frac{5T}{12}; \frac{7T}{12}\right]$ ,  $\left[\frac{7T}{12}; \frac{3T}{4}\right]$ ,  $\left[\frac{3T}{4}; \frac{11T}{12}\right]$ ,  $\left[\frac{11T}{12}; \frac{13T}{12}\right]$  et  $\left[\frac{13T}{12}; \frac{5T}{4}\right]$  où :  $T = \frac{1}{f}$  ( $f$  : fréquence du réseau), marquer les diodes

passantes sur le haut du document réponse N° :1 page 12.

3. Représenter, les grandeurs  $V_{AN}(t)$ ,  $V_{BN}(t)$  sur le document réponse N° :1 page 12.
4. Écrire une relation entre les grandeurs  $V_{AN}(t)$ ,  $V_{BN}(t)$  et  $V_{AB}(t)$ . En déduire alors la représentation de  $V_{AB}(t)$  sur le document réponse N° :1 page 12.
5. Représenter, sur le document réponse N° :2 page 13, l'allure de :

5.1- La tension  $V_{AK1}(t)$ , tension aux bornes de la diode  $D_1$ .

5.2- La tension  $V_{D4}(t)$ , tension aux bornes de la diode  $D_4$ . En déduire la tension inverse maximale supportée par les diodes du pont PD3 à diodes.

5.3- Le courant  $i_{D1}(t)$  dans la diode  $D_1$ .

5.4- Le courant  $i_{D4}(t)$  dans la diode  $D_4$ .

5.5- Le courant de ligne  $i_{e1}(t)$ .

6. Calculer les valeurs moyenne et efficace de  $i_{D1}(t)$  en fonction de  $I$ .
7. Établir la relation entre les valeurs moyennes suivantes :  $\langle V_{AB}(t) \rangle$ ,  $\langle V_L(t) \rangle$ , et  $\langle V_C(t) \rangle$ .
8. Calculer la valeur numérique de  $E = \langle V_C(t) \rangle$ . Déduire le rôle du filtre.
9. La charge constituée par le filtre et le moteur absorbe une puissance  $P = 6 \text{ kW}$ .

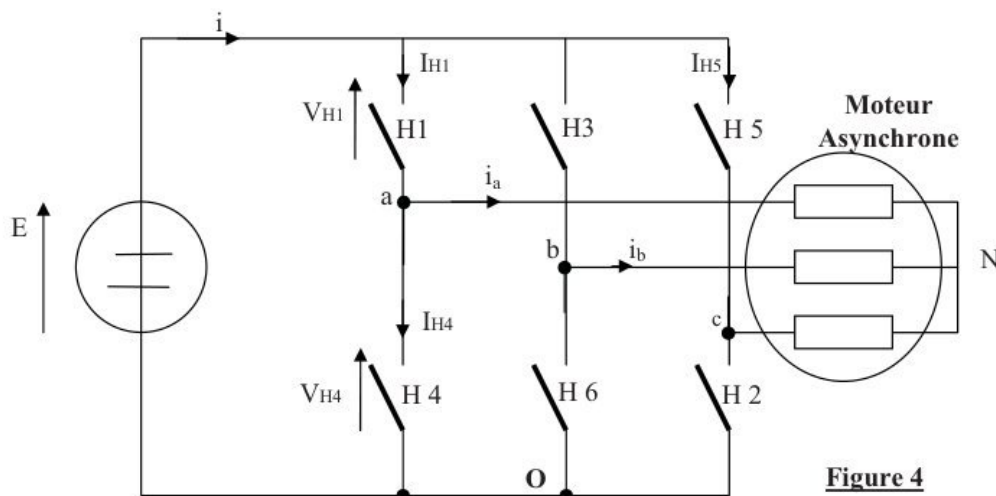
Calculer la valeur efficace  $I_{e1}$  de  $i_{e1}(t)$ . En déduire le facteur de puissance noté  $\lambda$  de l'installation triphasée du côté réseau.

Faire l'application numérique avec la valeur de  $I = 17A$ . Conclure.

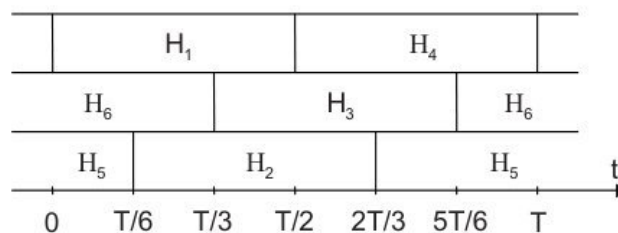
**10.** Pour cette question uniquement, le courant de ligne  $i_{e1}(t)$  sera considéré sinusoïdale de même valeur efficace trouvée à la question précédente. On souhaite relever le facteur de puissance  $\lambda$  appelé  $\cos\varphi$  à une valeur de **0,98** en branchant une batterie de condensateurs entre fils de phase. Si les condensateurs sont montés en triangle, quelle doit être leur valeur ? Quelle est la valeur de l'intensité fournie par le réseau sur les lignes désormais ?

## **PARTIE 2 : Étude de l'onduleur de tension en commande "Pleine onde"**

L'alimentation du moteur asynchrone est fournie par un onduleur triphasé à partir de la source continue  $E$ . Le schéma de principe est donné à la figure 4. Les séquences de fermeture des interrupteurs sont indiquées pour une période  $T$  de fonctionnement à la figure 5.



**Figure 4**



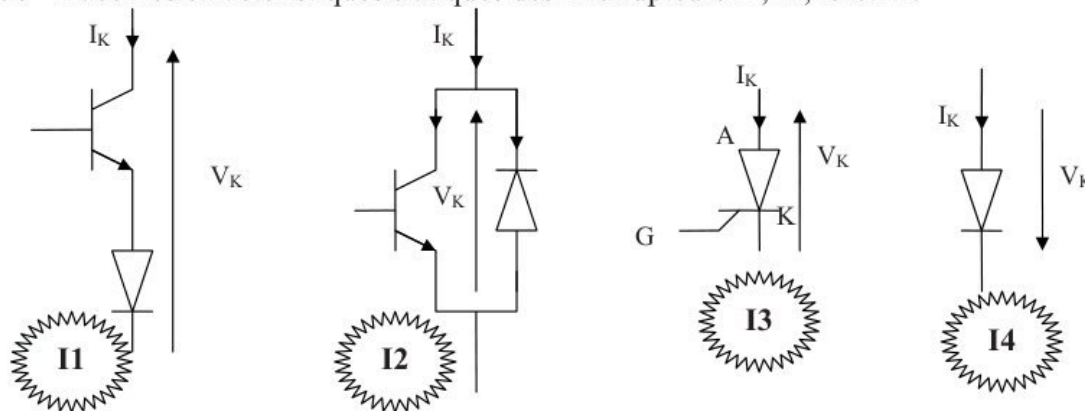
**Figure 5**

La technique permettant l'élaboration des ordres de commande des interrupteurs dépend de la fréquence désirée pour le moteur. Elle débute en modulation de largeur d'impulsions (permettant le fonctionnement à  $V/f$  constant) pour finir en mode pleine onde. Les intervalles de conduction des interrupteurs sont donnés sur le document réponse N° :3 page 14. Seul ce fonctionnement particulier est étudié.

1. Les interrupteurs présents sur un même bras de l'onduleur peuvent-ils être commandés simultanément à la fermeture ? Justifier la réponse.
2. Quel est l'intérêt d'alimenter la machine par un onduleur.
3. Représenter  $V_{ao}(t)$ ,  $V_{bo}(t)$ ,  $V_{co}(t)$  sur le document réponse N° :3 page 14.

Le moteur ayant un fonctionnement équilibré défini par  $V_{aN}(t) + V_{bN}(t) + V_{cN}(t) = 0$ .

4. Exprimer chacune des tensions simples aux bornes de la machine asynchrone  $V_{aN}(t)$ ,  $V_{bN}(t)$  et  $V_{cN}(t)$  en fonction de  $V_{a0}(t)$ ,  $V_{b0}(t)$  et  $V_{c0}(t)$ .
5. Représenter alors  $V_{aN}(t)$ ,  $V_{bN}(t)$  et  $V_{cN}(t)$  sur le document réponse N° : 3 page 14.
6. Citer une technique de commande permettant d'obtenir des tensions  $V_{aN}(t)$ ,  $V_{bN}(t)$  et  $V_{cN}(t)$  quasi-sinusoïdales.
7. Calculer la valeur efficace  $V_{aNeff}$  de la tension  $V_{aN}(t)$  en fonction de  $E$ . En déduire la valeur de  $E$  pour avoir  $V_{aNeff} = 254,65V$ .
8. Indiquer le cycle de fermeture des interrupteurs permettant d'inverser le sens de rotation du moteur asynchrone.
9. Tracer les caractéristiques statiques des interrupteurs I1, I2, I3 et I4.



10. La forme d'onde  $i_a(t)$  du courant dans la phase « a » étant donné sur le document réponse N° :4 page 15, ( $i_a(t)$  est assimilé à son fondamental), représenter d'une part en superposition à  $i_a(t)$  la grandeur  $V_{H1}(t)$  et d'autre part le courant  $i_{H1}(t)$  dans l'interrupteur  $H_1$ .
11. Dans un système d'axe  $i_{H1}$  en fonction de  $V_{H1}$ , tracer la caractéristique statique de l'interrupteur  $H_1$ , puis déduire le quel des quatre interrupteurs de la question 9 peut convenir pour réaliser l'interrupteur  $H_1$ .
12. En plus, on a intercalé entre filtre et onduleur un module à résistance  $R_h$  en série avec un interrupteur commandé  $Tr$  (voir figure 6 page 4), quel est le rôle de ce module ? Conclure sur la réversibilité des convertisseurs statiques.

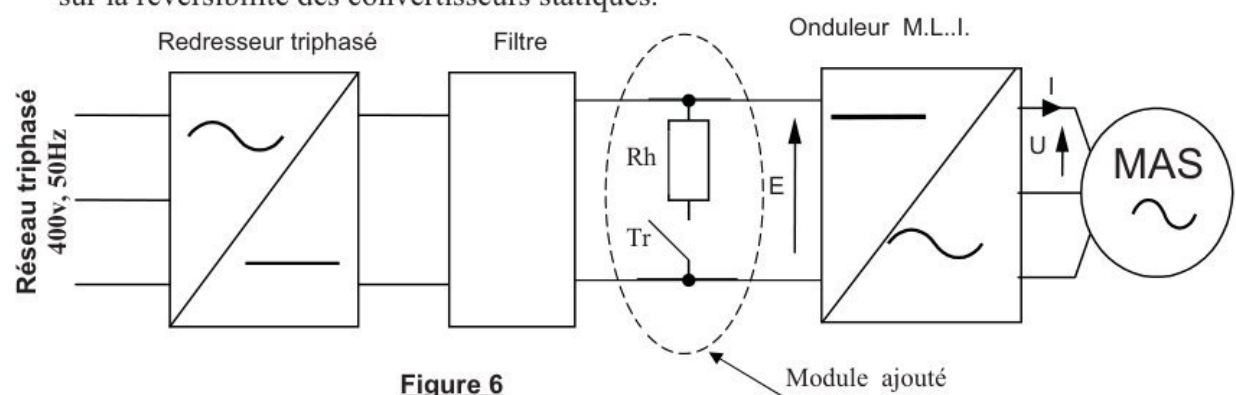


Figure 6

13. Comment arrive-t-on à remplir la même fonction du module, sans y avoir à l'ajouter mais plutôt en changeant la structure du redresseur triphasé, proposer un schéma.

**PARTIE 3 : Réalisation de la commande en "pleine onde" de l'onduleur :**

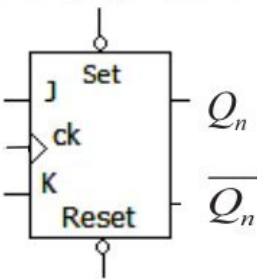
**On veut que :**  $Q_A$  commande l'interrupteur  $H_1$  ,  $Q_B$  commande l'interrupteur  $H_2$ ,  $Q_C$  commande l'interrupteur  $H_3$ ,  $Q_D$  commande l'interrupteur  $H_4$ ,  $Q_E$  commande l'interrupteur  $H_5$  et que  $Q_F$  commande l'interrupteur  $H_6$ .

Si l'interrupteur  $H_i$  est fermé le signal  $Q$  correspondant vaut 1, dans le cas contraire il vaut 0 (exemple :  $H_1$  fermé  $\Rightarrow Q_A = 1$  et  $H_1$  ouvert  $\Rightarrow Q_A = 0$ )

- 1. Donner alors les chronogrammes des commandes  $Q_A, Q_B, Q_C, Q_D, Q_E$  et  $Q_F$  sur le document réponse N° : 5 page 16.
- 2. En se basant sur le document réponse N°5, donner les équations logiques reliant :  $Q_A$  à  $Q_D$ ,  $Q_B$  à  $Q_E$  et  $Q_C$  à  $Q_F$ .

**I. Commande à l'aide de bascules JK.**

On se propose de réaliser la commande de l'onduleur à l'aide de bascules JK, dont la table de transition est donnée à la figure 7 :



**Figure 7**

Table de transition

| Reset | Set | Ck | $Q_{n-1}$ | $Q_n$ | J | K |
|-------|-----|----|-----------|-------|---|---|
| 1     | 1   | ↑  | 0         | 0     | 0 | x |
| 1     | 1   | ↑  | 0         | 1     | 1 | x |
| 1     | 1   | ↑  | 1         | 0     | x | 1 |
| 1     | 1   | ↑  | 1         | 1     | x | 0 |

Avec :  $Q_{n-1}$  l'état précédent de la sortie  $Q_n$ .

x peut être 0 ou 1.

Ck : horloge active front montant.

$Q_A, Q_B$  et  $Q_C$  seront respectivement les trois sorties de trois bascules JK notée A, B et C qui doivent répondre en même temps.

- 3. Toujours en s'aidant des chronogrammes du document réponse n° :5 page 16, reprendre sur la feuille de composition le tableau suivant et remplir les différents états des signaux  $Q_A, Q_B$  et  $Q_C$ .

|        | $Q_A$ | $Q_B$ | $Q_C$ | $J_A$    | $K_A$    | $J_B$    | $K_B$    | $J_C$    | $K_C$    |
|--------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Etat 0 | 1     |       |       | x        | 0        |          |          |          |          |
| Etat 1 | 1     |       |       |          |          |          |          |          |          |
| Etat 2 |       |       |       |          |          |          |          |          |          |
| Etat 3 |       |       |       |          |          |          |          |          |          |
| Etat 4 |       |       |       |          |          |          |          |          |          |
| Etat 5 |       |       |       |          |          |          |          |          |          |
| Etat 0 |       |       |       | //////// | //////// | //////// | //////// | //////// | //////// |

- 4. Étant donné la table de transition de la bascule JK, compléter les états de  $J_A, K_A, J_B, K_B, J_C$  et  $K_C$  dans le même tableau de la question précédente.
- 5. Donner l'équation logique la plus simplifiée possible de chacune des entrées  $J_A, K_A, J_B, K_B, J_C$  et  $K_C$ .
- 6. Donner le schéma réalisant la commande de l'onduleur, en y figurant toutes les commandes des interrupteurs.

**II. Commande à l'aide du registre à décalage 74194** (voir annexe 2 page 11) :

Le symbole normalisé IEC du registre de type 194 est donné à la figure 8. Le 74194 est un registre universel, dont les chronogrammes de fonctionnement sont donnés en annexe 2.

La fréquence de l'horloge du circuit 74194 est égal à  $\frac{6}{T}$  où T est la période (voir document réponse

- N° 5 page 16):
- $\overline{CLK}$ , l'entrée d'horloge, synchronise le registre sur les fronts montants.
  - $\overline{CLR}$ , entrée asynchrone de remise à zéro des sorties.
  - $P_0, P_1, P_2$  et  $P_3$ , entrées de chargement parallèle.
  - $R$ , entrée de chargement série côté droit,
  - $L$ , entrée de chargement série côté gauche,
  - $M_0$  et  $M_1$ , les entrées de contrôle synchrones. Les modes de fonctionnement sont donnés dans le tableau de la figure 9.
  - $S_0, S_1, S_2$  et  $S_3$ , sorties du registre et représentent son contenu. Utilisées simultanément, la lecture est parallèle. Si seule la dernière est utilisée, la lecture est série.

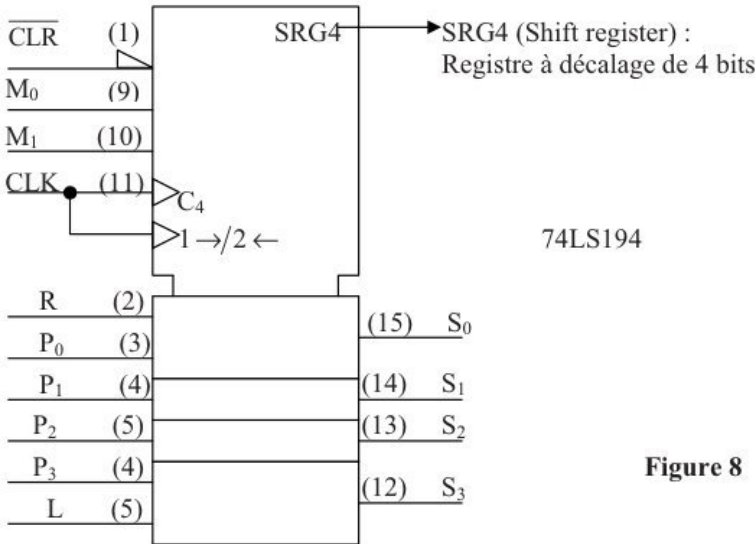


Figure 8

| M <sub>1</sub> | M <sub>0</sub> | Mode de fonctionnement                                                                                       |
|----------------|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0              | 0              | Inhibition (registre figé malgré l'horloge)                                                                  |
| 0              | 1              | Chargement série par l'entrée R, déplacement de l'information à droite (S <sub>0</sub> vers S <sub>3</sub> ) |
| 1              | 0              | Chargement série par l'entrée L, déplacement de l'information à gauche (S <sub>3</sub> vers S <sub>0</sub> ) |
| 1              | 1              | Chargement parallèle des entrées P <sub>0</sub> , P <sub>1</sub> , P <sub>2</sub> et P <sub>3</sub> .        |

Figure 9

On suppose qu'avant l'application du premier front montant de l'horloge (CKL), toutes les sorties à lecture parallèle sont au niveau bas ( $S_0 = S_1 = S_2 = S_3 = 0$ ), et  $R = 1$ .

7. Les trois premières sorties du 74194 correspondront respectivement aux commandes  $Q_A, Q_B$  et  $Q_C$  :
- 7.1. Étant donné les chronogrammes de la question 1 de la partie 3, Compléter le tableau suivant par transcription des états de  $S_0, S_1$  et  $S_2$ .

| CKL                | $S_0 = Q_A$ | $S_1 = Q_B$ | $S_2 = Q_C$ | $S_3$ | R |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------|---|
| 1 <sup>er</sup> ↑  |             |             |             |       |   |
| 2 <sup>ème</sup> ↑ |             |             |             |       |   |
| 3 <sup>ème</sup> ↑ |             |             |             |       |   |
| 4 <sup>ème</sup> ↑ |             |             |             |       |   |
| 5 <sup>ème</sup> ↑ |             |             |             |       |   |
| 6 <sup>ème</sup> ↑ |             |             |             |       |   |
| 7 <sup>ème</sup> ↑ |             |             |             |       |   |

7.2. En examinant de plus près le fonctionnement du 74194 grâce à l'annexe 2, Compléter le tableau par les états de  $S_3$  et de R. Á noter qu'on choisit de n'utiliser le 74194 que pour un décalage à droite.

7.3. Dédurre l'équation logique la plus simplifiée de R.

8. Étant donné le résultat de la question 2 et celui de la question 7 de la partie 3, donner le schéma réalisant la commande de l'onduleur à l'aide du 74194, en y figurant toutes les commandes des interrupteurs, ainsi que le brochage nécessaire pour le bon fonctionnement du registre à décalage.

#### **PARTIE 4 : Étude du moteur asynchrone en régime permanent**

##### **Notations :**

|            |                        |                                                                                                                    |
|------------|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| U          | (V)                    | Tension composée.                                                                                                  |
| V          | (V)                    | Tension simple.                                                                                                    |
| $f$        | (Hz)                   | Fréquence des courants statoriques.                                                                                |
| $f_r$      | (Hz)                   | Fréquence des courants rotoriques.                                                                                 |
| $\omega$   | (rad.s <sup>-1</sup> ) | Pulsation des courants statoriques.                                                                                |
| $\Omega_s$ | (rad.s <sup>-1</sup> ) | Vitesse de rotation du champ tournant créé dans l'entrefer par les courants statoriques.                           |
| $\Omega$   | (rad.s <sup>-1</sup> ) | Vitesse angulaire de la machine.                                                                                   |
| $n_s$      | (tr.s <sup>-1</sup> )  | Vitesse de rotation du champ tournant créé dans l'entrefer par les courants statoriques (vitesse de synchronisme). |
| $n$        | (tr.s <sup>-1</sup> )  | Vitesse de rotation de la machine.                                                                                 |

Le moteur asynchrone utilisé est du type triphasé 230 V / 400 V, 50 Hz a un stator couplé en étoile et un rotor à cage. Sous alimentation nominale on a obtenu :

- Á vide, un courant de ligne d'intensité 4,9A ;
- Á charge nominale, un courant de ligne d'intensité 10,82A, une puissance absorbée de 6kw et une vitesse de rotation de 1460 tr.min<sup>-1</sup>.

Dans toute la partie, on néglige les résistances et inductances de fuite statoriques, les pertes fer et les pertes mécaniques.

##### **I. Fonctionnement au régime nominal de la machine**

Le moteur asynchrone est alimenté sous 230v/400v, 50Hz.

1. Calculer le nombre de pôles de ce moteur.

2. Calculer le glissement,  $g_n$ .
3. Calculer la puissance réactive nominale absorbée  $Q_{a_n}$ .

Pour mesurer la puissance active  $P_{a_n}$  et la puissance réactive  $Q_{a_n}$  absorbées, on a utilisé le schéma de la figure 10. Calculer les indications  $P_1$  du wattmètre  $W_1$  et  $P_2$  du wattmètre  $W_2$ .

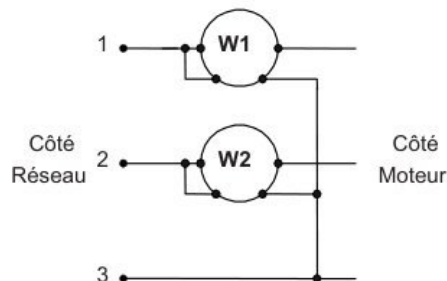


Figure 10

4. Calculer le moment du couple utile nominal  $C_{u_n}$ .
5. Si le moment du couple résistant imposé par la charge diminue, comment évoluent
  - L'intensité en ligne ?
  - La vitesse de rotation ? Quelle sera sa valeur limite ?
6. Calculer les pertes rotoriques par effet joule.

## II. Recherche des éléments d'un modèle équivalent simplifié

La figure 11 représente un modèle linéaire simplifié d'une phase statorique.

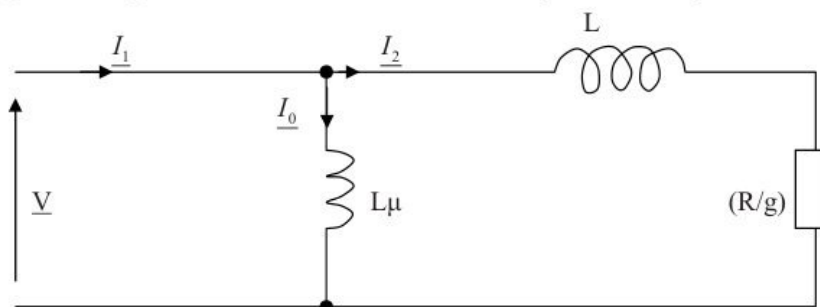


Figure 11

$L_\mu$  : inductance magnétisante du stator.

$L$  : Inductance globale de fuites ramenée au stator.

$R$  : résistance du rotor ramenée au stator.

7. Calculer les valeurs de  $L_\mu$ ,  $L$  et  $R$ .

Quelque soit les valeurs trouvées on prendra Pour la suite du problème

$$R = 0,6 \, \Omega \text{ et } L = 15 \, \text{mH}.$$

## III. Étude du moment du couple électromagnétique $C_{em}$

8. Exprimer le moment du couple électromagnétique  $C_{em}$  en fonction de  $R$ ,  $L$ ,  $V$ ,  $f$  et  $f_r$ .
9. Montrer que pour les faibles valeurs de  $f_r$  on peut écrire :  $C_{em} = \alpha \times \left(\frac{V}{f}\right)^2 \times f_r$ .

Définir  $\alpha$  et calculer sa valeur numérique.

IV. Fonctionnement à vitesse de synchronisme variable.

Pour cette étude, on reste dans l'hypothèse de la question 9) du (III) de la partie 4.  
Le moteur est alimenté par le convertisseur de fréquence qui permet de maintenir aux bornes d'un enroulement le rapport  $\frac{V}{f}$  constant.

10. Sachant que pour  $V = V_n$  on a  $f = 50$  Hz, montrer que  $C_{em}$  peut s'écrire :  $C_{em} = \alpha' \times f_r$  .

- 10.1- Donner la valeur numérique de  $\alpha'$ .
- 10.2- Calculer le couple électromagnétique nominal pour un glissement de 2,67% .

11. On rappelle que la fréquence  $f_r$  des courants rotoriques peut s'exprimer par :  
 $f_r = p \times (n_s - n)$  (où  $p$  est le nombre de paire de pôles de la machine asynchrone).  
Donner la nouvelle expression de  $C_{em}$  en fonction de  $n_s$  et  $n$ .

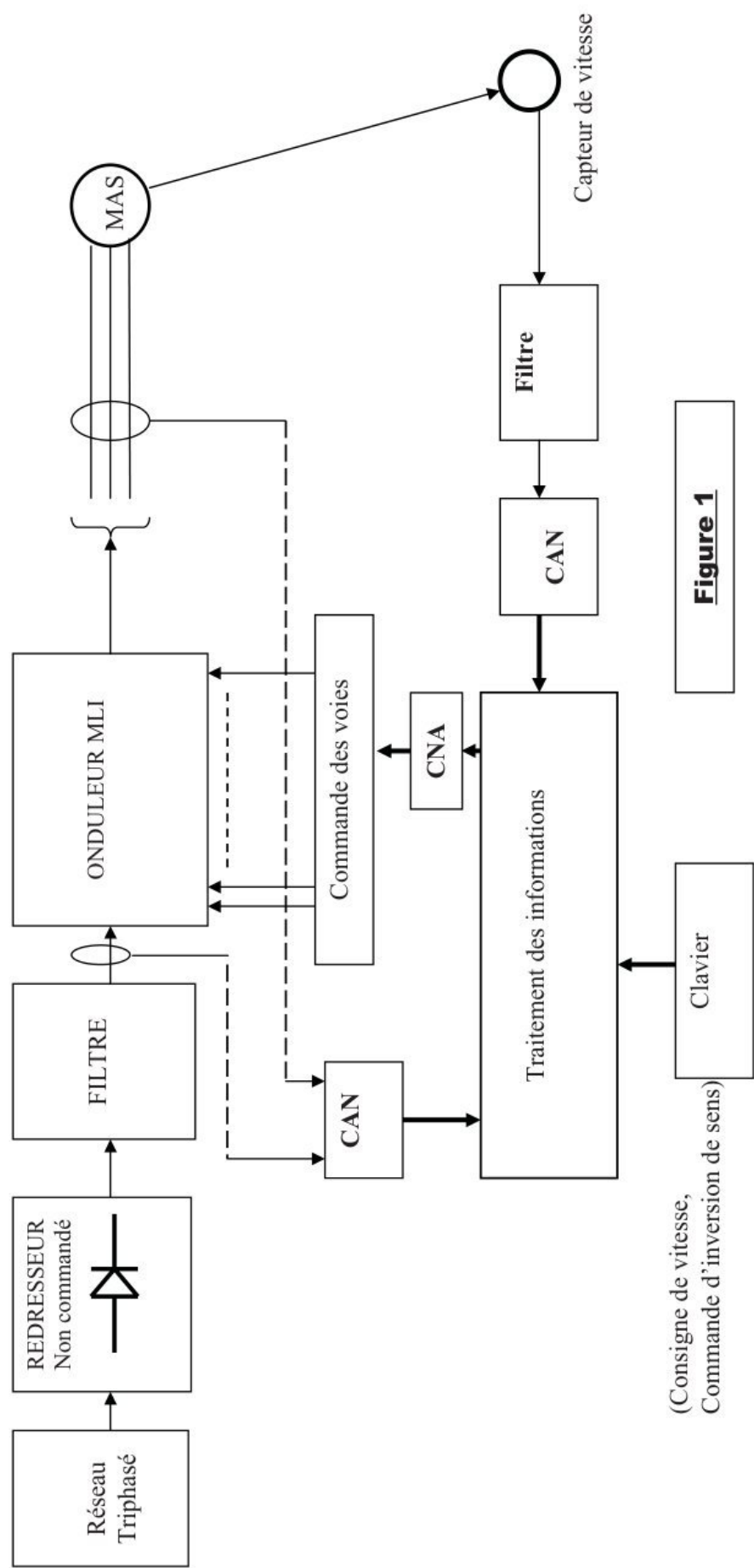
12. Le moteur entraîne une charge mécanique qui lui oppose un couple résistant de moment constant  $C_r = 32$  N.m. Compléter le tableau suivant, et conclure.

|                                                                            |      |    |    |
|----------------------------------------------------------------------------|------|----|----|
| Fréquence délivrée par l'onduleur $f$ (Hz)                                 | 12,5 | 30 | 50 |
| Tension d'alimentation délivrée par l'onduleur $V$ (v)                     |      |    |    |
| Vitesse de rotation de la machine asynchrone $n$ en (tr.mn <sup>-1</sup> ) |      |    |    |
| $\Delta n = n_s - n$ (tr.mn <sup>-1</sup> )                                |      |    |    |
| Glissement correspondant $g$ en (%)                                        |      |    |    |

13. On souhaite démarrer le moteur avec un couple égal à 38,19 N.m. Calculer la fréquence minimale que doit alors délivrer l'onduleur.

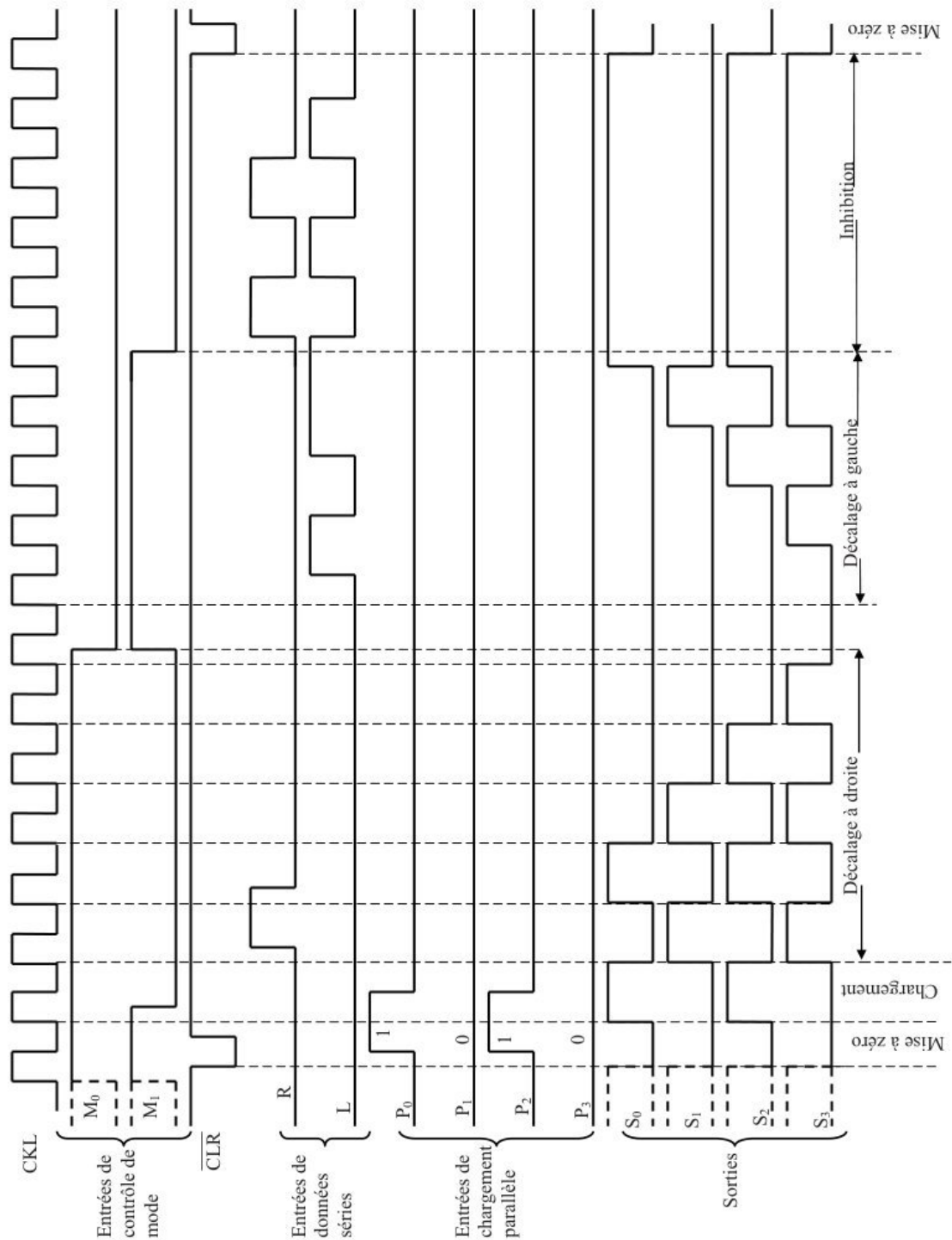
Fin de l'énoncé

**ANNEXE 1** : Schéma de principe de régulation de vitesse de la machine asynchrone.



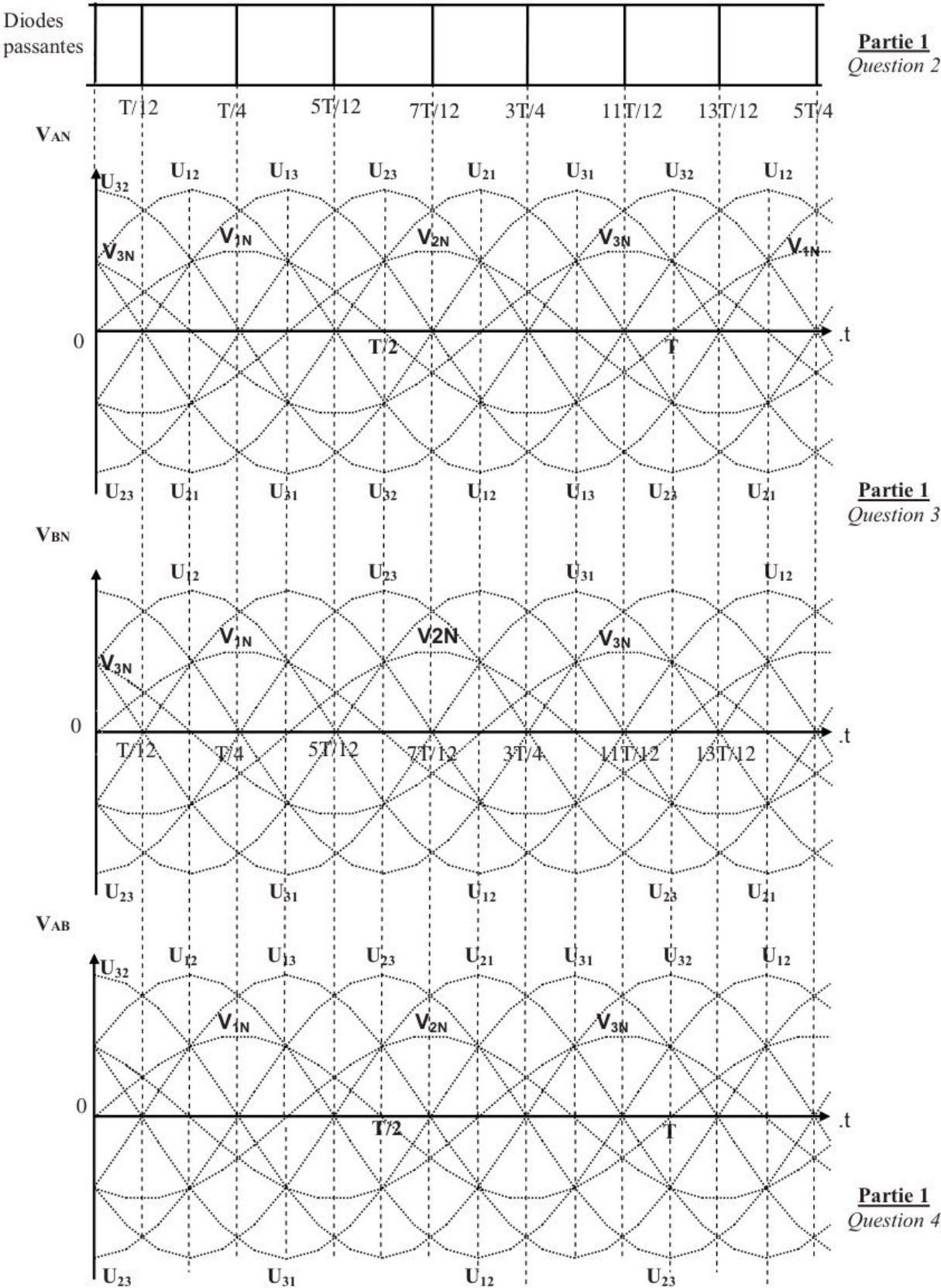
**Figure 1**

ANNEXE 2: Chronogrammes de fonctionnement du 74194



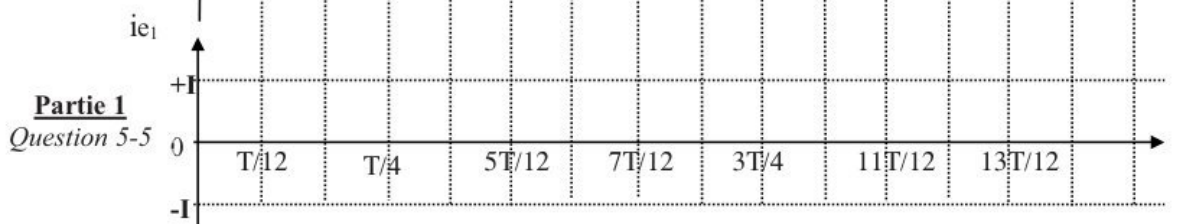
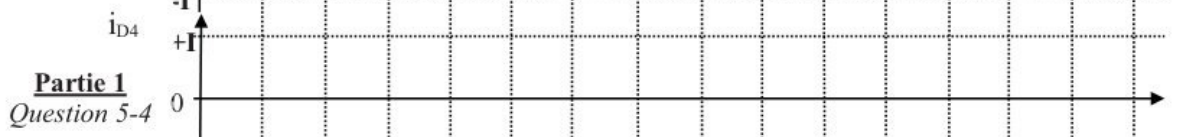
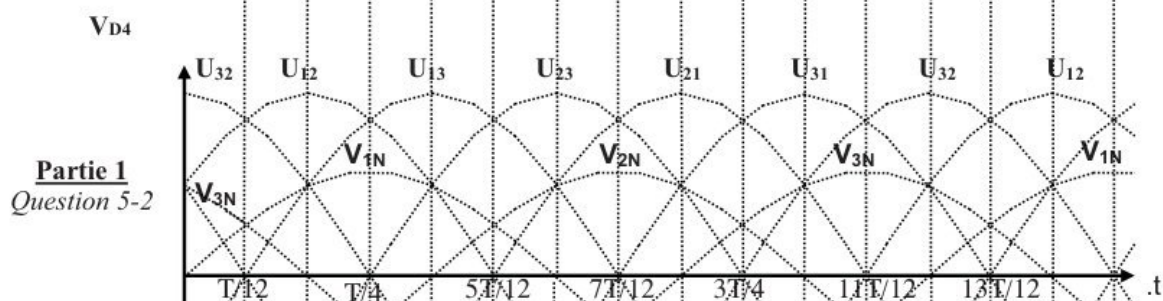
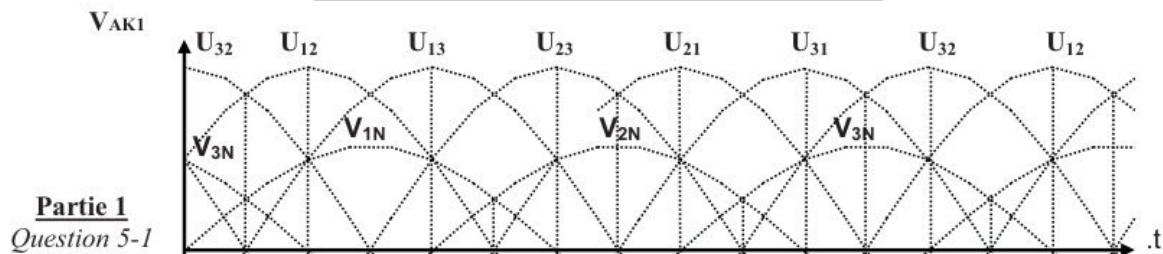
N.B : Il est interdit de signer les documents réponses ou d’y mettre un signe quelconque pouvant servir à l’identification du candidat ou à la provenance de la copie.

**Document réponse N° :1**  
**À agraffer sur la copie de composition de**  
**l'épreuve du génie électrique**



N.B : Il est interdit de signer les documents réponses ou d’y mettre un signe quelconque pouvant servir à l’identification du candidat ou à la provenance de la copie.

**Document réponse N° :2**  
**Àagrafer sur la copie de composition**  
**de l’épreuve du génie électrique**





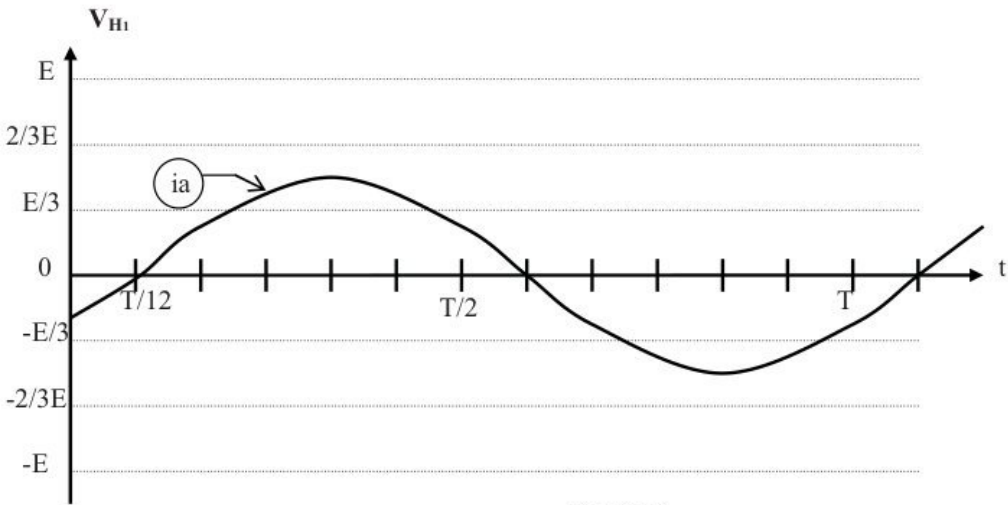
**N.B :** Il est interdit de signer les documents réponses ou d’y mettre un signe quelconque pouvant servir à l’identification du candidat ou à la provenance de la copie.

Document réponse N° :4

Àagrafer sur la copie de composition de l'épreuve du génie électrique

|    |    |    |    |
|----|----|----|----|
| H1 |    | H4 |    |
| H6 | H3 |    | H6 |
| H5 | H2 |    | H5 |

Interrupteurs en conduction



Partie 2

Question 10

